

## 伝統構法架構の復元力特性に及ぼす対角線効果

### Diagonal Effect on Restoring Force Characteristics of Traditional Timber Frames

棚橋秀光<sup>1</sup>・岩本いづみ<sup>2</sup>・鈴木祥之<sup>3</sup>

Hideaki Tanahashi, Izumi Iwamoto and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup> 立命館大学客員研究員, 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

<sup>2</sup> 大阪府立大学工業高等専門学校講師, 総合工学システム学科 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

Lecturer, Osaka Prefecture University College of Technology

<sup>3</sup> 立命館大学教授, 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

There are many traditional timber buildings which should be conserved as valuable cultural assets in Japan. For their conservation, appropriate seismic evaluation and reinforcements are urgently required. The authors pointed out that the diagonal of horizontal beams expands the column spacing depending on the constraint conditions of both columns when they inclined due to horizontal loading. They named such an effect as “Diagonal Effect” and the effect affects the restoring force characteristics of the frame. This paper describes the diagonal effect of traditional timber frames on the restoring force characteristics based on the experimental results of traditional timber frames and some analyses.

**Keywords :** *traditional timber frame, restoring force characteristics, diagonal effect, frame loading test*

#### 1. はじめに

わが国には貴重な文化財を含む神社・仏閣、町家、古民家などの伝統木造建築物が多く存在する。それらの維持・保存のために適切な耐震性能評価と耐震補強が求められており、地震時における仕口（接合部）の回転抵抗による復元力の適切な評価が最も重要となる。著者らは柱貫接合部の復元力は主に回転めり込み抵抗に起因すると考え、十字型通し貫仕口の弾塑性にわたる復元力のメカニズムとその復元力特性の定式化を提案<sup>1)</sup>した。その中で、仕口単体の実験では現れないが、1 スパン以上の軸組架構の水平載荷実験では、柱頭・柱脚の左右の開きが拘束された状態で柱が傾斜を起こすと、両側の柱に挟まれた状態で横架材が柱間隔を押し広げる挙動が無視できない場合があることを指摘した。著者らはこの効果を、伝統構法軸組架構と仕口に広く見られる対角線効果（Diagonal Effect:DE と略す）のひとつと見なした<sup>2)</sup>。力学的な現象としては、束が回転に伴い、上下の梁を押し広げる挙動と同じものであり、著者らは E-ディフュゼンスにおける伝統構法建築物の実大実験(2010)で床束の傾斜に伴って梁を突上げる挙動を明らかにし、その実験的・解析的な解明を行った<sup>3)4)</sup>。これに先立って、束ではないが、横架材が同様な挙動を示すことは、岩本らの差鴨居を有する軸組架構の実験の解析結果によってすでに報告されている<sup>5)</sup>。

本研究では、伝統構法の数種の仕口をもつ複数スパンの架構の静的水平載荷実験結果<sup>6)</sup>のデータをもとに、足固めをもつ 2 スパン架構の水平載荷実験の DE に焦点をあて、架構の復元力特性に及ぼす DE の影響を解析的に検証する。

## 2. 架構実験の概要

試験体は3本の柱と2本の横架材で構成される2スパン架構を基本とする。柱長は2500mmで、1スパンは1500mmである。試験体および加力装置を図1に示す。柱頭および柱脚をピン接合とし、接合部のみにモーメントが生じるようにしている。柱脚のピンは土台に固定する。柱頭の3本のピンは鉄骨梁でつなぎ、ロードセルを介して、オイルジャッキに接続し、加力を行う。加力は同形状の試験体を2体分用意し(ただし柱は1体で共用)、単調载荷(試験体にMONの記号を付す)と繰返载荷(同CY1)の2種類行った。繰返载荷は正負3回繰返しとし、変形角の履歴は $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/30$ 、 $\pm 1/15$ 、 $\pm 1/10$ 、 $\pm 1/8.6$ 、 $\pm 1/7.5$ 、 $\pm 1/6.7$ 、 $\pm 1/6$ 、 $\pm 1/5.5$ radとした。繰返载荷後、単調载荷では最大変形角が約1/3.3radまでとした。各柱の柱頭、接合部上下にワイヤー変位計、柱脚に一般用変位計を設置した。また接合部の回転角を算出するため、接合部にも一般用変位計を設置した。部材の曲げモーメントおよび軸力を求めるため、ひずみゲージは柱上部、下部の左右にそれぞれ6箇所、それぞれの横架材の上下に10箇所貼付した。

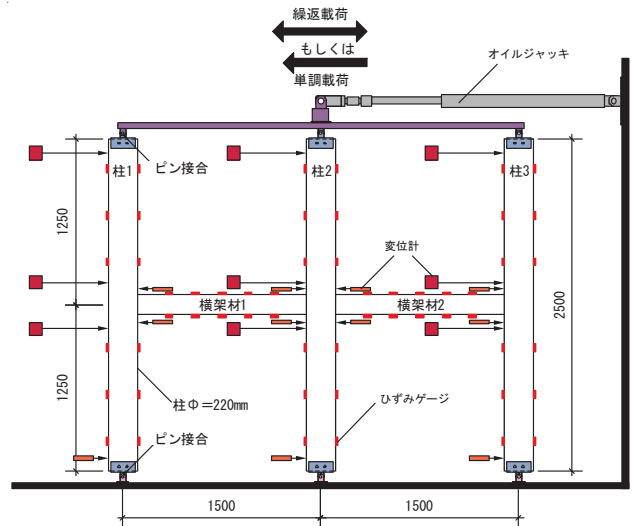


図1 試験体および加力装置

試験体は接合部(仕口)の種類によって7種類用意した。各試験体の接合部の詳細を図2に示す。通肘木TH、足固め長手AN、足固め短手AMの3種類が通しの雇いほぞを有する構造である。通肘木の仕口は軸組の長手、短手で上下反転の関係にあるため、長手、短手の区別はない。虹梁長手KN、虹梁短手KMの2種類は通しでない雇いほぞを柱と蟻で接合する形式(引き独鈞)になっている。内法貫長手UNおよびそれに直交する内法貫短手UMは接合部内部で合欠きになっている通し貫構造である。内法貫短手UMのみ接合部の構造上、2本柱1スパン架構の試験体とした。柱はすべて直径220mmのヒノキであり、横架材はすべてベイヒバである。雇いほぞ、楔、込栓、車知栓はすべてカシである。

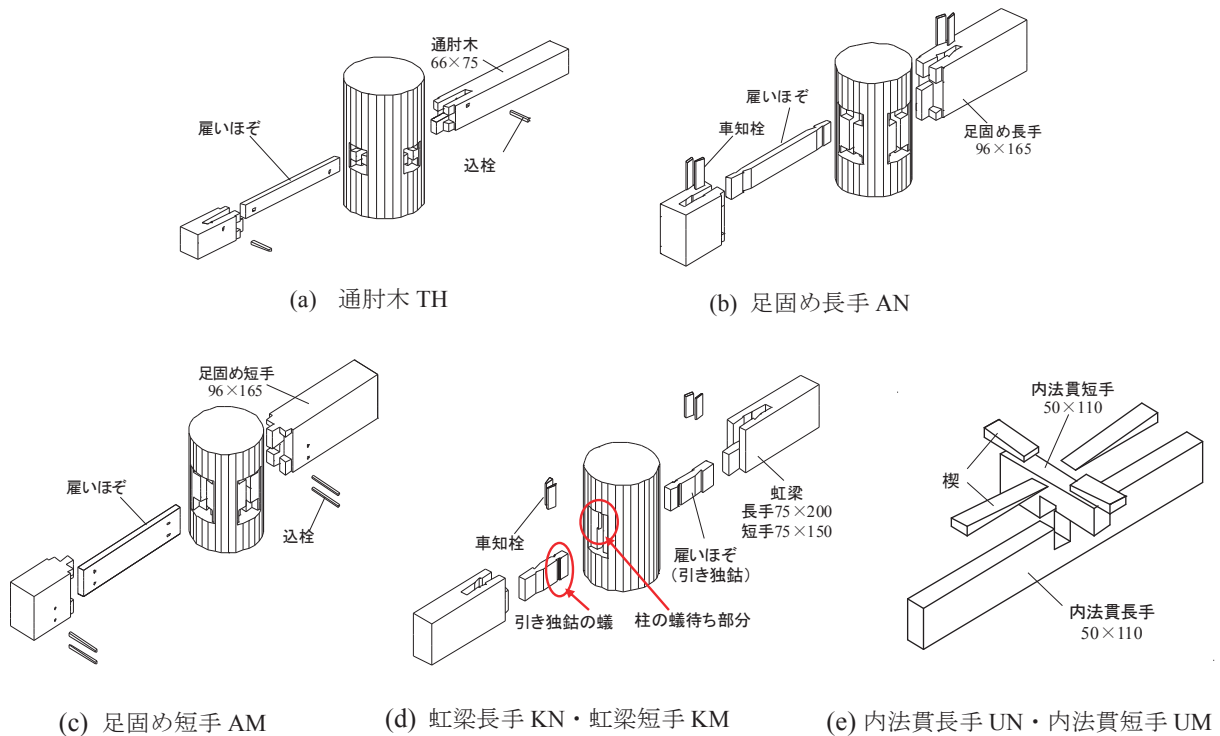


図2 接合部詳細図(単位:mm)

### 3. 実験結果の概要

#### (1) 各試験体の損傷状況

各試験体の損傷状況を表1に示す。通肘木 TH では、込栓がせん断破壊した箇所がいくつかあった。込栓が変形しなかった箇所では、雇いほぞが込栓の穴部分から割裂した。足固め長手 AN では、ほとんどの車知栓が圧縮破壊したが、雇いほぞおよび横架材に大きな損傷は見られなかった。足固め短手 AM では、すべての箇所で込栓の変形が進行し、込栓が完全にせん断破壊していたが、雇いほぞおよび横架材に大きな損傷は見られなかった。虹梁長手 KN・虹梁短手 KM は、車知栓や雇いほぞに損傷はなく、柱の仕口の蟻待ち部分が割裂した。横架材にも大きな損傷は見られなかった。内法貫長手 UN・内法貫短手 UM では、横架材に加力初期から、他の雇い構造の試験体には見られなかった大きなひび割れを生じた。解体してみると、柱の接合部内部で横架材が曲げ破壊し、分割されていた。しかし、加力終了まで接合部が外れることはなかった。また楔には若干の変形は見られたものの、大きな損傷はなかった。本実験における5種類の雇いほぞ形式では最大変形角が1/3.3radを超えても、横架材には大きな損傷が無かったことが特徴として挙げられる。

#### (2) 各試験体の復元力特性

図3に各試験体について、単調載荷(MON)の復元力と繰返載荷(CY1)の正および負方向の復元力の包絡線を示す。貫構造の UN・UM は他の雇い構造とは異なり、1/15~1/10rad で最も早く最大耐力に達している。その後、耐力を大きく変動させながら低下していく。足固め長手 AN はおよそ 1/9rad、足固め短手 AM はおよそ 1/6.7rad で最大耐力に達する。通肘木 TH は繰返載荷で 1/9rad、単調載荷で 1/6rad で最大耐力に達する。虹梁 KN・KM については、繰返載荷では、最大耐力に達する前に加力が終了しているが、単調載荷においては最大耐力時の変形角がおよそ 1/4rad であることが明らかとなった。いずれも雇いほぞ形式の5体は最大耐力後の耐力劣化が緩やかになっている。

表1 試験体の損傷状況

試験体	柱の		横架材		雇いほぞ		補助材	
	主要な損傷	種類	主要な損傷	種類	主要な損傷	種類	主要な損傷	種類
通肘木TH	なし	通肘木	なし	柱貫通	穴部分からの割け	込栓(1本)	せん断破壊	
足固め長手AN	なし	足固め長手	なし	柱貫通	なし	車知栓(2本)	圧縮破壊	
足固め短手AM	なし	足固め短手	なし	柱貫通	なし	込栓(2本)	せん断破壊	
虹梁長手KN	仕口の蟻待ち部分での割裂	虹梁長手	なし	柱片側	なし	車知栓(2本)	なし	
虹梁短手KM		虹梁短手	なし	柱片側	なし	車知栓(2本)	なし	
内法貫長手UN	なし	内法貫長手	柱仕口内部で分割	—	—	楔(柱貫通)	なし	
内法貫短手UM	なし	内法貫短手		—	—	楔(柱片側)	なし	

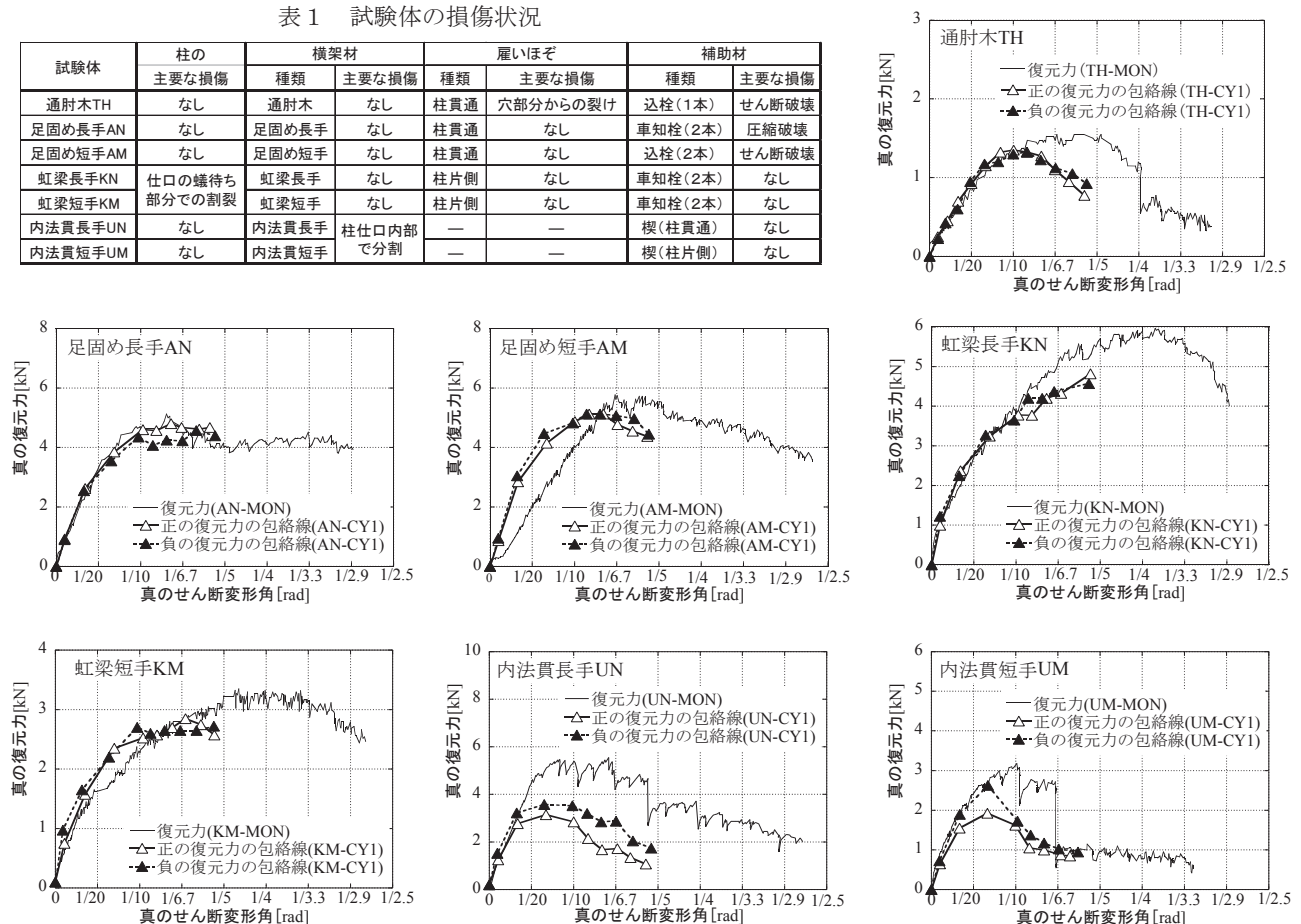


図3 各試験体の架構の復元力特性

## 4. 足固め長手 AN の応力・変形の分析

### (1) AN の復元力特性とメカニズム

前章の 7 種類の復元力特性の中で最も特徴的な架構として足固め長手 AN を選び、実測データの応力分布・変形破壊状況より復元力のメカニズムを明らかにする。

繰返载荷の AN-CY1 と単調载荷の AN-MON の復元力を図 4 に重ねて示す。繰返しによるスリップ変形は増加するが、復元力は  $0.2\text{rad}$  以降  $0.35\text{rad}$  の最大変形までほとんど低下せず、極めて大きな変形性能を持つ。その架構の最大の変形状況は図 5 の矢印で示す様に、梁は対角線に突っ張り、外柱は押し広げられて外側に湾曲し、中柱の仕口では左右の梁が上下にずれて押し合っている。仕口の変形と各部のめり込み破壊状況は図 6 に示すように雇いほぞを介して左上と右下のめり込み力  $R_1$  がつり合う。雇いほぞは図 7 のように引張力  $T_1$  で抜け出そうとするが、車知栓がずれ留めとして抵抗する。この車知栓が回転すると竿道を押し広げ、目違いの柱からの拔出しにより竿道の拘束が緩むと梁の割裂が起こり、車知栓の抵抗力は低下する。こうして雇いほぞ仕口としての主要な抵抗はほぼ喪失する。

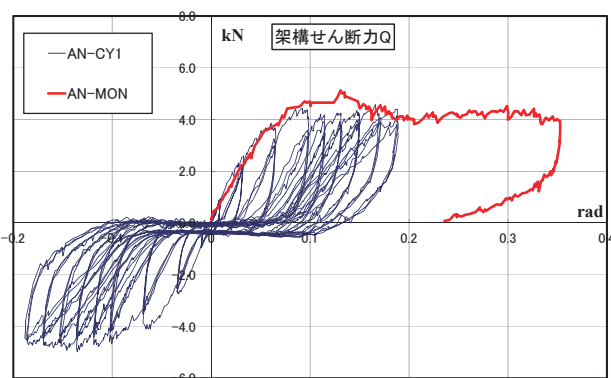


図 4 AN-CY1 と AN-MON の復元力特性

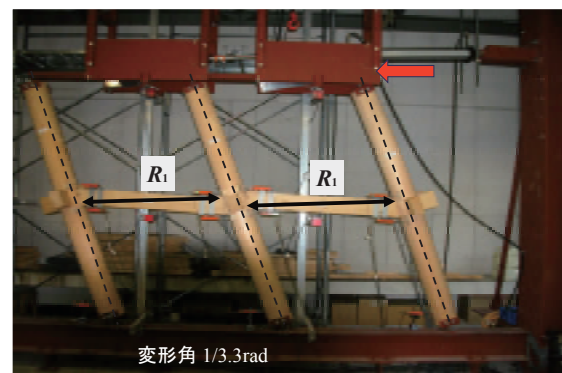


図 5 AN の最大変形時の変形状況(1/3.3rad)

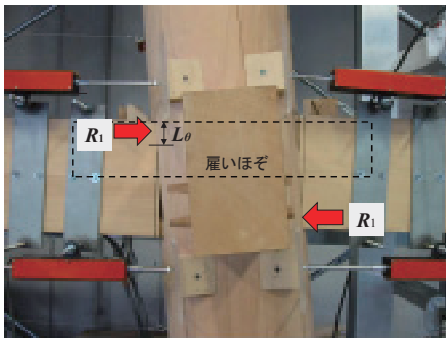


図 6 雇いほぞ仕口の正面変形状況(1/10rad)

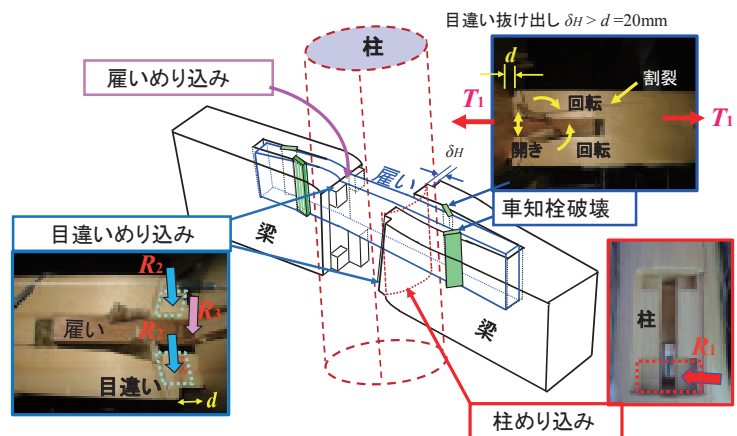


図 7 雇いほぞ仕口各部のめり込み変形と破壊状況

しかし、柱の傾斜に伴い柱間隔は狭まることと、梁の対角線が梁長さより長いという 2 重の効果により、梁が柱に胴付きで突っ張るため新たな抵抗メカニズムが支配的になると推察する。このメカニズムを DE による抵抗メカニズムと考え、仕口の詳細に拘わらず柱に胴付き面があれば、一定の抵抗力を発揮する。その前提には、柱頭・柱脚の水平間隔の拘束が必要で、実架構でスパンが連続する場合には、相互に拘束しあう状況が想定されることから、このような DE によるメカニズムは大変形時には十分ありうると考えられる。

### (2) モーメント分布の推定

図 8 のように、ひずみゲージの値より各測定位置での曲げモーメント（柱○印、梁●印）を算出し、柱・



梁ごとに直線近似式  $ax+b$  を仮定し、曲げモーメント実測値との誤差を  $e$  とするとき、以下の節点方程式と層方程式の 5 つの条件式を満たす条件付き誤差  $e$  の最小化問題としてラグランジュの未定乗数法を用いてモーメント分布を求めて図 9 に示す。

$$\left. \begin{aligned} -a_1 h_1 + a_2 h_2 - b_7 &= 0 \\ -a_3 h_1 + a_4 h_2 + (a_7 l_1 + b_7) - b_8 &= 0 \\ -a_5 h_1 + a_6 h_2 + (a_8 l_2 + b_8) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{節点方程式}$$

$$\left. \begin{aligned} a_1 + a_3 + a_5 &= -Q \\ a_2 + a_4 + a_6 &= Q \end{aligned} \right\} \text{層方程式}$$

特徴的なことは：①左向きの水平加力にも拘らず、外柱が左右対称に近い形で外側に反る形のモーメントを示す。②中柱と梁は一般の水平せん断力を受けた場合のモーメント分布となっている。これらの結果は、各試験体に共通しており、先に述べた梁の DE による突っ張りが柱の大きな曲げモーメントをもたらすことを示す。

### (3) AN-MON の梁端部モーメント

上記で算定したモーメント分布から  $1/3.3\text{rad}$  における梁のモーメントと、仕口回転角—梁端部モーメント関係を図示すると図 10 のようになり、4 個所の梁端部モーメントは、いずれもほぼ同じ履歴をとり、 $0.2\text{rad}$  以降は、 $0.35\text{rad}$  まで  $2.1\sim 2.8\text{kNm}$  程度のレベルを保つ。これより、梁端部モーメントと釣り合う中柱のモーメントもほぼ一定値を取ることがわかる。

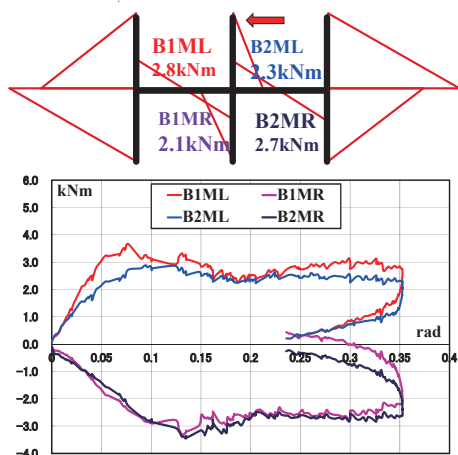


図 10 AN-MON の梁端部モーメント

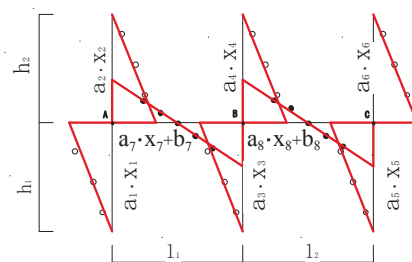


図 8 モーメント分布の仮定

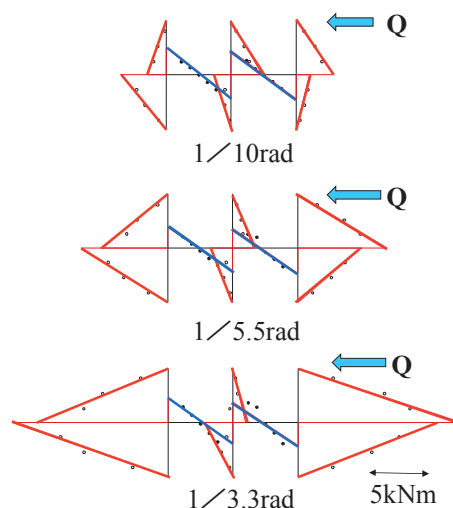


図 9 AN-MON のモーメント分布

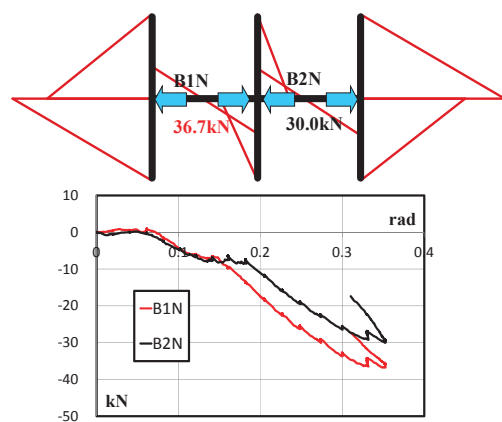


図 11 AN-MON の梁軸力

### (4) 梁軸力・柱モーメント分布

梁の軸力は図 11 のように  $0.1\text{rad}$  程度から急増し、最大  $30\sim 37\text{kN}$  となり、図 12 の柱の曲げモーメントをもたらす要因となっていることがわかる。この傾向は、梁高さが最も大きな KN 試験体で最大となり、対角線が長くなることと関連しているのは DE によることから当然といえる。最大曲げモーメントは  $14\sim 18\text{kNm}$ 、最大曲げ応力度  $\sigma = 17\text{N/mm}^2$  程度となるが、柱の曲げ破壊には十分余裕がある。また、柱の水平せん断力の分担は梁のモーメントから推定すると、概ね外柱:中柱=0.6:1 となっている。

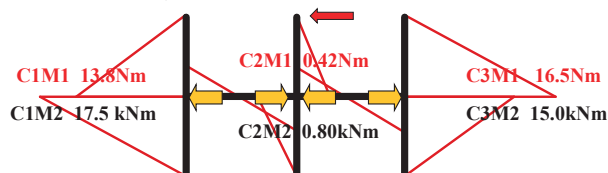


図 12 AN-MON の柱の最大曲げモーメント分布

## 5. 弾塑性パステルナーク・モデル (EPM) シミュレーション

### (1) 雇いほぞ仕口の回転復元力

載荷初期の仕口の復元力は主に雇いほぞ仕口によるもので、著者らは基本的に 3 つのメカニズム M1、M2、M3 から成ることを説明しており、M2 は若干変更しているが、その概念図を図 13 に示す。

メカニズムM1：雇いほぞ・車知栓を介して左右の梁が柱にめり込む

メカニズムM2：梁の目違い部に柱エッジがめり込む

メカニズムM3：雇いほぞが通し貫として抵抗する

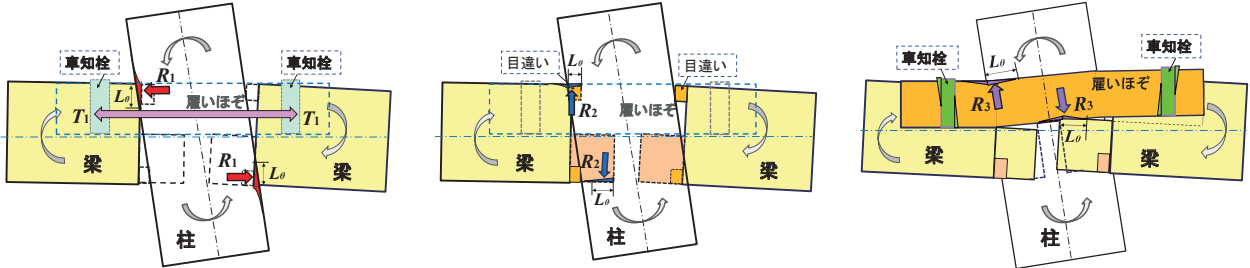


図 13 雇いほぞ仕口の 3 つのメカニズム

M1 は前章で概要を述べたが、左右の筈道に落とし込まれた雇いほぞが車知栓を介して梁と接合され、柱に傾斜が生ずると柱に回転めり込み反力  $R_1$  が発生し、両側の梁を押し上げようとする DE が発生し、同時に雇いほぞには引張力  $T_1 \approx R_1$  が発生して釣り合うメカニズムである。その力学モデルを図 14 に示す。雇いほぞと車知栓の嵌合による引張剛性が有限なため、梁間隔は  $\delta H$  拡がり、回転めり込みの接触長さ  $L_\theta$  は図 6 の変形状況から  $1/10\text{rad}$  で  $36\text{mm}$ 、 $1/3.3\text{rad}$  で  $20\text{mm}$  程度である。3 つのメカニズムの中で M1 が主要な抵抗力となるが、車知栓が破壊するとこのメカニズムは抵抗力を喪失する。

M2 は梁の目違い部が柱の傾斜により回転めり込みを受けるメカニズムで、左右独立に作用するが、右側は上部の目違い深さが浅いため抵抗力は小さいことと目違いの呑み込みが柱から外れると抵抗はなくなる。

M3 は雇いほぞ自体が通し貫として作用するメカニズムで、その抵抗力は梁と車知栓・筈道との嵌合度および柱のほぞ穴内部のゆるみに依存する。

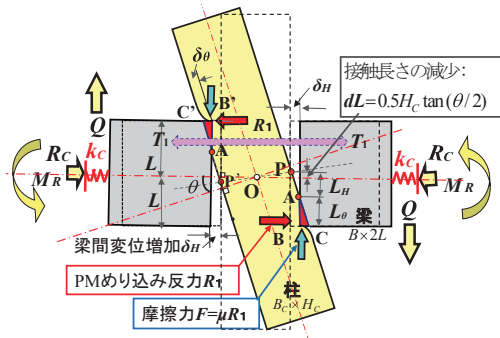


図 14 雇いほぞ仕口のメカニズム M1 の力学モデル

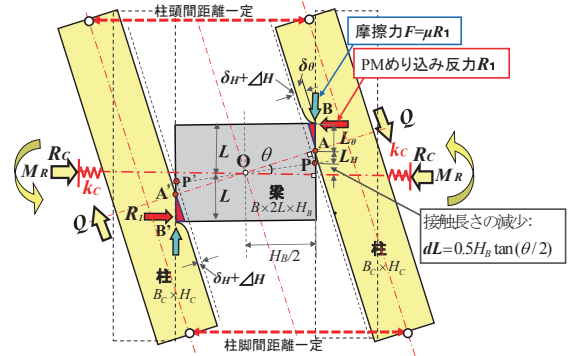


図 15 梁を東に見立てた力学モデル

### (2) 束モデルによる仕口の復元力

車知栓の回転・破壊により雇いほぞ仕口のメカニズムが機能しなくなった後は、DE による梁の突っ張りのメカニズムが次第に支配的になる。その力学モデルを図 15 に示す。これは、著者らが束モデルとして定式化したものを  $90^\circ$  度回転させて柱の傾斜に伴い梁が柱に胴付きでめり込むタイプへの拡張である。図 14、15 は拘束条件はやや異なるが、力学的には、ばね  $kc$  で拘束された梁の柱へのめり込み問題として統一して扱うことができる。

### (3) 定式化と EPM シミュレーション

上記の力学モデルに基づく定式化は弾塑性パステルナーク・モデル (Elasto-plastic Pasternak Model:EPM と

略す) によるものとし、図 14、15 を参照して、通し貫<sup>1)</sup>および束の回転めり込みモデルの定式化<sup>8)</sup>を準用して以下に示す。雇いほぞのモデルの場合は雇いほぞの引張剛性  $kc$  が主な拘束条件となり両側の梁が柱にめり込み  $\delta_H$  だけ梁間隔が広がり、その時のめり込みの接触長さ  $L_\theta$  の三角形めり込み反力  $R_1$  が点対称に釣り合うとする。その際、雇いほぞには左右の梁を拘束する引張力  $T_1$  が車知栓を介して作用する。

束モデルでは梁を挟む両側の柱が柱頭・柱間隔が一定の拘束条件で柱が傾斜し、柱間隔が狭くなる効果(その変位を  $\Delta H$ ) と梁の対角線が梁長さより長い効果により、梁に圧縮力が発生して柱変位 ( $\delta_H + \Delta H$ ) だけ押し上げると同時に柱へのめり込みを発生させ、三角形めり込みの接触長さ  $L_\theta$  のめり込み反力  $R_1$  と釣り合う。この場合の拘束は柱の曲げ剛性によるが、ばね  $kc$  は接触長さに対応するように設定する。以下、その弾性段階の定式を示す。復元力はめり込み抵抗  $M_R$  と摩擦抵抗  $M_F$  の合計とし、束モデルは摩擦を介して抵抗するので摩擦抵抗は復元力には含めない。弾塑性段階は既往の定式化によるものとし<sup>1)</sup>、ここでは省く。

$B$ : 梁幅、 $H_B$ : 梁長さ、 $B_C$ : 柱幅、 $H_C$ : 柱高さ、 $2L$ : 梁高さ、 $E$ : 柱梁の横圧縮ヤング係数、 $L_\theta$ : めり込み接触長さ、 $\gamma H$ : 無次元特性値、 $\mu$ : 摩擦係数、 $k = E/H_C$ : 圧縮剛性、 $\rho = (L - L_\theta)/L_\theta$ : 回転めり込み反力の重心の調整係数

$\left\{ \begin{array}{l} L_\theta = L + dL - L_H : L_H = \delta_H / \tan \theta, dL = 0.5 H_C \tan(\theta/2) : \text{雇いほぞ} \\ L_\theta = L - dL - L_H : L_H = (\delta_H + \Delta H) / \sin \theta, dL = 0.5 H_B \tan(\theta/2), \Delta H = 0.5 H_B (1 - \cos \theta) : \text{束} \end{array} \right\}$  の関係を用いて

$$\text{PMによるめり込み変位(P点より縦方向の距離: } x) : W = \begin{cases} \theta(x - L_H) & : L_H < x \leq L_\theta + L_H \\ L_\theta \theta e^{-\gamma(x - L_\theta - L_H)} & : x \geq L_\theta + L_H \end{cases} \quad (1)$$

$$R_1 = \int_{L_H}^{\infty} kWBdx = \frac{EBL_\theta^2}{2H_C} \left(1 + \frac{2}{\gamma L_\theta}\right) \theta = \frac{EBL_\theta^2}{2H_C} \zeta_N \theta = K_{N0} \zeta_N \theta : \text{めり込み反力} \quad (2)$$

$$M_R = 2 \int_{L_H}^{\infty} kWBxdx = \frac{2EBL_\theta^3}{3H_C} \left[1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_\theta} \left(1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_\theta}\right)\right] \theta = \frac{2EBL_\theta^3}{3H_C} \zeta_R \theta = K_{R0} \zeta_R \theta : \text{回転めり込みのモーメント} \quad (3)$$

$$M_F = \mu R_1 (H_C + 2\delta_H) = \mu \frac{EBL_\theta^2}{2H_C} (H_C + 2\delta_H) \zeta_F \theta = \mu K_{F0} \zeta_F \frac{H_C + 2\delta_H}{H_C} \theta : \text{めり込みに伴う摩擦によるモーメント} \quad (4)$$

$$K_{N0} = \frac{EBL_\theta^2}{2H_C} : \text{圧縮に関する基本剛性、} \zeta_N = 1 + \frac{2}{\gamma L_\theta} : \text{圧縮に関する剛性増大率} \quad (5)$$

$$K_{R0} = \frac{2EBL_\theta^3}{3H_C} : \text{回転めり込みによる基本剛性、} \zeta_R = 1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_\theta} \left(1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_\theta}\right) : \text{回転めり込みに関する剛性増大率} \quad (6)$$

$$K_{F0} = \frac{EBL_\theta^2}{2} : \text{回転めり込みの摩擦に関する基本剛性、} \zeta_F = 1 + \frac{2}{\gamma L_\theta} : \text{回転めり込みの摩擦に関する剛性増大率} \quad (7)$$

接触長さ  $L_\theta$  は以下の関係を用いて求める

雇いほぞの場合:  $\delta_H = (L + dL - L_\theta) \tan \theta$ 、 $R_1 = k_C \delta_H$  の関係から

$$\frac{EBL_\theta^2}{2H_C} \left(1 + \frac{2}{\gamma L_\theta}\right) \theta = k_C (L + dL - L_\theta) \tan \theta \quad (8)$$

ここで、 $l = \frac{k_C H_C \tan \theta}{EB\theta} \cong \frac{k_C H_C}{EB}$  として(8)式の近似解は

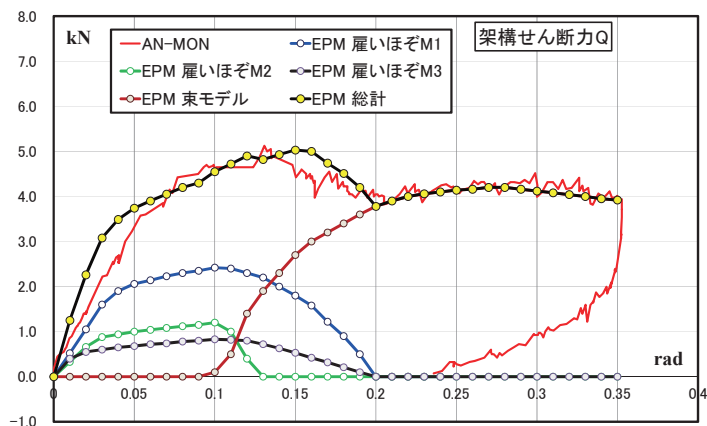
$$L_\theta = -\left(l + \frac{1}{\gamma}\right) + \sqrt{\left(l + \frac{1}{\gamma}\right)^2 + 2l(L + dL)} \quad (9a)$$

束の場合は柱間隔が狭くなる効果を  $\delta_H$  に  $\Delta H = 0.5 H_B (1 - \cos \theta)$  を追加して同様に

$$L_\theta = -\left(l + \frac{1}{\gamma}\right) + \sqrt{\left(l + \frac{1}{\gamma}\right)^2 + 2l[L - dL + 0.5 H_B (1 - \cos \theta) / \sin \theta]} \quad (9b)$$

解析パラメータはヒノキ・ベイヒバとも縦圧縮試験ヤング係数  $E_L = 8.65 \text{ GPa}$ 、横圧縮ヤング係数  $E = 400 \text{ MPa}$ 、PM の無次元特性値  $\gamma H = 3.6$ 、降伏応力度  $\sigma_y = 7.2 \text{ MPa}$ 、形状関数のパラメータ  $\eta = 1.4$ 、塑性ひずみ倍率  $C = 24$ (雇いほぞ)、 $1.4$ (束)、摩擦係数  $\mu = 0.5$ 、 $0.3 \text{ rad}$  時の接触長さ  $L_\theta = 14.0 \text{ mm}$  である。雇いほぞ仕口の復元力は北守らの実験結果<sup>8)</sup>を参考に車知栓が  $0.1 \text{ rad}$  で降伏し  $0.2 \text{ rad}$  でほぼ喪失するとする。目違い部の復元力は目違いが外れる  $0.1 \text{ rad}$  までとした。束モデルは梁の軸力は図 10 より  $0.06 \text{ rad}$  から発現するが、安定して直線的に急増を始めるレベルを  $0.1 \text{ rad}$  と仮定し、 $0.1 \text{ rad}$  だけスリップしたあとに復元力が発生するとして、それらの総計により復元力特性のシミュレーションを試みた。その結果を実験結果に重ねて図 16 に示す。初期の剛性の算定結果がやや過大であるが、各メカニズムの剛性はめり込み部位の横圧縮ヤング係数が支配的であることから、該当する部位の樹種と年輪傾角に応じた横圧縮ヤング係数などの設定により精度良いシミュレ

ーションが可能になると考え、パラメータの見直しの余地はある。今回のシミュレーションは実験結果を概ねトレースできており、定式化の妥当性を裏付けるものと考ええる。他の試験体は全て仕口形状が異なっており、そのまま適用はできないが、各々の仕口のメカニズムを整理して準用することで適用の可能性がある。また、本実験では図 14, 15 のモデルは連続しており、一体とした統合モデルも考えられ、引き続き検討を進める。



## 6. 結論

図 16 AN 架構の復元力特性シミュレーション

複数スパンの伝統構法軸組の通肘木、足固め、虹梁、内法貫の仕口をもつ 7 種類の平面架構を対象に、3 サイクル繰り返し載荷と最大 1/3.3rad に至る大変形領域までの単調載荷により、その復元力特性と破壊挙動を明らかにした。最大耐力は、1/15rad~1/4rad レベルで達し、大変形領域では繰り返しによる耐力低下の程度は異なるが、1/3.3rad までは崩壊することなく変形性能を維持した。

その中で、足固め長手の架構 AN を抽出して雇いほぞモデルと束モデルを準用して詳細を検討することにより、横架材が突っ張り、柱に大きな曲げモーメントを発生させていることが明らかとなった。載荷変位の増加に伴い、架構の水平せん断力や梁のモーメントには大きな変化はないが、外柱の曲げモーメントは激増し、仕口では車知栓の破壊が起こっているが、架構は不安定になることはなかった。対角線効果で、足固めが柱にめり込みつつ突っ張るというメカニズムが形成され、安定した挙動を示すことによるものである。

このような挙動は、仕口単体での実験では確認できないもので、1 スパン以上の架構に初めて現れ、仕口の詳細にかかわらず、柱に胴付きの部分があれば、柱を押し広げる効果がある。実在の構造物では柱頭・柱脚の柱間隔を拘束する程度に依存するが、多スパンになるほど、その拘束は大きくなると推察されるため、実在架構の全体より精度良い復元力にはこのような対角線効果を考慮することが望ましい。

**謝辞：**本研究は東本願寺耐震調査研究委員会（委員長：鈴木祥之）における接合部の実験として実施した。記して謝意を表する。

## 参考文献：

- 1) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の回転めり込み弾塑性特性と十字型通し仕口の定式化，日本建築学会構造系論文集，Vol.76, No. 667, 1675-1684, 2011.9.
- 2) Tanahashi, H. and Suzuki, Y.: Basic concept and general formulation of restoring force characteristics of traditional wooden joints, 12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering (WCTE2012), Auckland, New Zealand, 2012.7.
- 3) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統的構法の束の回転めり込み挙動の一考察，日本地震工学会大会 2011 梗概集，pp.370-371, 2011.11.
- 4) 棚橋秀光・大岡 優・伊津野和行・鈴木祥之：伝統的構法の束の回転めり込み実験とその考察，日本地震工学会大会 2012 梗概集，pp.262-263, 2012.11.
- 5) 岩本いづみ・前野将輝・大西功人・後藤正美・鈴木 祥之：単位フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価 その9:差鴨居を有する伝統木造軸組の曲げモーメント分布，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.123-124, 2003.9.
- 6) 岩本いづみ・清水秀丸・前野将輝・鈴木 祥之：寺院建築における伝統木造軸組架構の耐震性能評価（その4）静的実験による柱—横架材接合部の復元力特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.21-22, 2004.8.
- 7) Tanahashi, H. and Suzuki, Y.: Embedment mechanism and formulation of major types of traditional wooden joints in Japan, 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering(15WCEE), Lisbon, Portugal, 2012.9.
- 8) 北守顕久・野村昌史・稲山正弘・後藤正美：雇い竿車知栓留め柱—梁接合部の引張性能評価式の提案 伝統構法における雇い竿車知栓留め柱—梁接合部の力学性能 その1，日本建築学会構造系論文集，Vol.79, No. 695, 93-102, 2014.1.